

Annexe 6

Objectifs de formation et programme de chimie de la classe préparatoire scientifique ATS métiers de la chimie

Le programme de chimie de la classe d'ATS métiers de la chimie s'inscrit entre deux continuités : en amont avec la formation reçue par les étudiants titulaires d'un DUT ou d'un BTS et en aval avec les enseignements dispensés dans les grandes écoles. Ce programme est conçu pour apporter aux étudiants un bagage théorique complémentaire à leurs acquis antérieurs, pour leur permettre de poursuivre avec succès un cursus d'ingénieur, de chercheur, de scientifique, pour éveiller leur curiosité et leur permettre de se former tout au long de la vie.

L'objectif de l'enseignement de chimie est d'abord de développer des compétences propres à la pratique de la démarche scientifique :

- observer et s'approprier une problématique ;
- analyser et modéliser ;
- valider ;
- réaliser et créer.

Cette formation doit aussi développer d'autres compétences dans un cadre scientifique :

- communiquer, à l'écrit et à l'oral ;
- être autonome et faire preuve d'initiative.

Ces compétences sont construites à partir d'un socle de connaissances et de capacités défini par ce programme qui identifie, pour chacun des items, les connaissances scientifiques, mais aussi les savoir-faire, les capacités que les étudiants doivent maîtriser à l'issue de la formation. L'acquisition de ces capacités constitue un objectif prioritaire pour le professeur.

Comprendre, décrire, modéliser, prévoir, nécessitent une solide formation théorique. Le professeur s'appuiera sur des exemples concrets afin de lui donner du sens. La diversité des domaines scientifiques abordés ne doit pas masquer à l'étudiant la transversalité des concepts et des méthodes utilisés, que le professeur veillera à souligner. Théorique et expérimentale, la formation de l'étudiant est multiforme et doit être abordée par des voies variées. Ainsi le professeur doit-il rechercher un point d'équilibre entre des approches apparemment distinctes, mais souvent complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative.

Observer, mesurer, confronter un modèle au réel nécessitent la pratique d'une démarche expérimentale. La formation expérimentale antérieure des étudiants en ATS métiers de la chimie permet d'envisager un engagement dans la réalisation d'un ou plusieurs projets, qui donnera sens aux concepts et aux lois introduites.

L'autonomie de l'étudiant et sa capacité à prendre des initiatives sont développées à travers la pratique d'activités de type « résolution de problèmes », qui visent à apprendre à mobiliser des savoirs et des savoir-faire pour répondre à des questionnements précis. Ces résolutions de problèmes, qui trouvent tout à fait leur place aussi dans le cadre des travaux par projet précédemment évoqués, amènent l'étudiant à proposer lui-même un protocole, à le mettre en œuvre, pour le valider ou l'invalider.

Dans ce programme, sont suggérées quelques thématiques pouvant être abordées à partir de l'étude d'un document. L'objectif de cette « approche documentaire » est d'apprendre à l'étudiant à compléter ses connaissances et ses savoir-faire par l'exploitation de ressources et de documents scientifiques variés, ce qu'il aura inévitablement à pratiquer dans la suite de sa formation et de sa vie professionnelle.

La mise en œuvre de la démarche scientifique en physique-chimie fait souvent appel aux mathématiques, tant pour la formulation du modèle que pour en extraire des prédictions. Le professeur veillera à n'avoir recours à la technicité mathématique que lorsqu'elle s'avère indispensable, et à mettre l'accent sur la compréhension des phénomènes physiques et chimiques. Néanmoins l'étudiant doit savoir utiliser de façon autonome certains outils mathématiques dans le cadre des activités relevant de la chimie.

Enfin, lorsqu'il en aura l'opportunité, le professeur familiarisera l'étudiant à recourir à une approche numérique, qui permet une modélisation plus fine et plus réaliste du réel, par exemple par la prise en compte d'effets non linéaires. C'est l'occasion pour l'étudiant d'exploiter ses capacités concernant l'ingénierie numérique et la simulation qu'il a acquises dans sa formation antérieure. Dans ce domaine des démarches collaboratives sont recommandées.

Le programme de chimie de la classe d'ATS métiers de la chimie est structuré en trois parties :

- dans la première partie sont décrites les compétences que la pratique de la « **démarche scientifique** » permet de développer pendant la formation à travers certaines de ses composantes : la démarche expérimentale, la résolution de problèmes et les approches documentaires. Ces compétences et les capacités associées seront exercées et mises en œuvre dans des situations variées tout au long de l'année

en s'appuyant sur les autres parties du programme. Les compétences mentionnées dans cette partie tissent des liens transversaux entre les différentes rubriques du programme, contribuant ainsi à souligner l'idée d'une science constituée de domaines interdépendants ;

- dans la deuxième partie, intitulée « **démarche de projet et formation expérimentale** », sont rappelées les méthodes et les capacités expérimentales que les étudiants maîtrisent et mettent en œuvre dans la démarche de projet ;
- la troisième partie, intitulée « **formation disciplinaire** », décrit les connaissances et capacités associées aux contenus disciplinaires propres à la classe d'ATS métiers de la chimie. Elles sont présentées en deux colonnes : la première colonne décrit les « notions et contenus » ; en regard, la seconde colonne précise les « capacités exigibles » associées dont l'acquisition par les étudiants doit être la priorité du professeur. L'évaluation vise à mesurer le degré de maîtrise du socle ainsi défini et le niveau d'autonomie et d'initiative des étudiants. Lors de la conception des évaluations, on veillera soigneusement à identifier les capacités mobilisées afin d'en élargir le plus possible le spectre.

Ce programme indique les objectifs de formation à atteindre en fin d'année pour tous les étudiants. Il ne représente en aucun cas une progression imposée au professeur, libre de traiter le programme dans l'ordre qui lui semble le plus adapté à ses étudiants. Dans le cadre de sa liberté pédagogique, le professeur, pédagogue et didacticien, organise son enseignement en respectant trois grands principes directeurs :

- il doit privilégier la mise en activité des étudiants en évitant le dogmatisme : l'acquisition des connaissances, des capacités et des compétences sera d'autant plus efficace que les étudiants seront acteurs de leur formation. Les supports pédagogiques utilisés doivent notamment contribuer à la réflexion, la participation et l'autonomie des étudiants. La formation expérimentale, l'approche documentaire, la résolution de problèmes favorisent cette mise en activité ;
- il doit savoir recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes naturels, de procédés ou d'objets technologiques. Lorsque le thème traité s'y prête, le professeur peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, des questions d'actualité ou des débats d'idées ;
- il contribue à la nécessaire mise en cohérence des enseignements scientifiques ; la progression en chimie doit être articulée avec celles mises en œuvre dans les autres disciplines, mathématiques, physique, génie des procédés et informatique.

Partie 1 - Démarche scientifique

1. Dimension expérimentale de la formation et démarche de projet

La chimie est une science à la fois théorique et expérimentale. Ces deux parties de la démarche scientifique s'enrichissent mutuellement, leur intrication est un élément essentiel de notre enseignement.

C'est la raison pour laquelle il est essentiel d'articuler la démarche de projet et les contenus et modèles abordés dans ce programme. Il s'agit de susciter un engagement actif et collectif autour d'une problématique bien choisie permettant de réinvestir la réflexion théorique et la modélisation, les lois simplificatrices et unificatrices, les concepts transversaux entre différents domaines de la chimie. La pratique expérimentale dans le cadre de la démarche de projet permet de réinvestir, parfois consolider, les savoir-faire techniques et les connaissances dans le domaine de la mesure et de l'évaluation de sa précision, d'autonomie dans la mise en œuvre de protocoles.

Compétences spécifiques mobilisées lors d'activités à caractère expérimental

Les activités expérimentales en classe d'ATS Métiers de la chimie mobilisent les compétences spécifiques qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none">- rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec une situation expérimentale- énoncer une problématique d'approche expérimentale- définir les objectifs correspondants
Analyser	<ul style="list-style-type: none">- formuler et échanger des hypothèses- proposer une stratégie pour répondre à la problématique- proposer un modèle- choisir, concevoir ou justifier un protocole ou un dispositif expérimental- évaluer l'ordre de grandeur d'un phénomène et de ses variations
Réaliser	<ul style="list-style-type: none">- mettre en œuvre un protocole- utiliser (avec la notice) le matériel de manière adaptée, en autonomie pour

	<p>celui de la liste « matériel », avec aide pour tout autre matériel</p> <ul style="list-style-type: none"> - mettre en œuvre des règles de sécurité adéquates - effectuer des représentations graphiques à partir de données expérimentales
Valider	<ul style="list-style-type: none"> - exploiter des observations, des mesures en identifiant les sources d'erreurs et en estimant les incertitudes - confronter un modèle à des résultats expérimentaux - confirmer ou infirmer une hypothèse, une information - analyser les résultats de manière critique - proposer des améliorations de la démarche ou du modèle
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> - à l'écrit comme à l'oral : <ul style="list-style-type: none"> o présenter les étapes de son travail de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensible o utiliser un vocabulaire scientifique adapté o s'appuyer sur des schémas, des graphes - faire preuve d'écoute, confronter son point de vue
Être autonome, faire preuve d'initiative	<ul style="list-style-type: none"> - travailler seul ou en équipe - solliciter une aide de manière pertinente - s'impliquer, prendre des décisions, anticiper

Concernant la compétence « **communiquer** », l'aptitude à rédiger un compte-rendu écrit constitue un objectif de la formation. Dans ce cadre, on doit développer les capacités à définir la problématique du questionnement, à décrire les méthodes, en particulier expérimentales, utilisées pour y répondre, à présenter les résultats obtenus et l'exploitation, graphique ou numérique, qui en a été faite, et à analyser les réponses apportées au questionnement initial et leur qualité. Les activités de projet sont aussi l'occasion de travailler l'expression orale lors d'un point de situation ou de la présentation finale. Le but est de préparer les étudiants d'ATS à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur. L'utilisation d'un cahier de laboratoire, au sens large du terme en incluant par exemple le numérique, peut constituer un outil efficace de formation.

La compétence « **être autonome, faire preuve d'initiative** » est par nature transversale et participe à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences. Le recours à des activités de projet est particulièrement adapté pour renforcer la capacité de prise d'initiative et d'autonomie des étudiants.

2. Résolution de problèmes

Dans l'acquisition de l'autonomie, la « résolution de problèmes » est une activité intermédiaire entre l'exercice cadré qui permet de s'exercer à de nouvelles méthodes, et la démarche de projet, pour laquelle le but à atteindre n'est pas explicite. Il s'agit pour l'étudiant de mobiliser ses connaissances, capacités et compétences afin d'aborder une situation dans laquelle il doit atteindre un but bien précis, mais pour laquelle le chemin à suivre n'est pas indiqué. Ce n'est donc pas un « problème ouvert » pour lequel on soumet une situation en demandant « Que se passe-t-il ? ». L'objectif à atteindre doit être clairement donné et le travail porte sur la démarche à suivre, l'obtention du résultat et son regard critique.

La résolution de problèmes permet de se confronter à des situations où plusieurs approches sont possibles, qu'il s'agisse de la méthode mise en œuvre ou du degré de précision recherché. Ces situations se prêtent bien à une résolution progressive pour laquelle un premier modèle permettra d'obtenir rapidement un résultat, qui sera ensuite discuté et amélioré. Cette résolution étagée doit permettre à tous les élèves d'aborder le problème selon leur rythme en s'appuyant sur les compétences qu'ils maîtrisent.

C'est sur la façon d'appréhender une question scientifique, sur le choix raisonné de la méthode de résolution et sur les moyens de vérification qu'est centrée la formation de l'élève lors de la démarche de résolution de problèmes. La résolution de problèmes mobilise les compétences qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier le problème.	<p>Faire un schéma modèle.</p> <p>Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</p> <p>Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</p> <p>Relier le problème à une situation modèle connue.</p>

Établir une stratégie de résolution (analyser).	Décomposer le problème en des problèmes plus simples. Commencer par une version simplifiée. Expliciter la modélisation choisie (définition du système, etc.). Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.
Mettre en œuvre la stratégie (réaliser).	Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique. Utiliser l'analyse dimensionnelle. ...
Avoir un regard critique sur les résultats obtenus (valider).	S'assurer que l'on a répondu à la question posée. Vérifier la pertinence du résultat trouvé, notamment en comparant avec des estimations ou ordres de grandeurs connus. Comparer le résultat obtenu avec le résultat d'une autre approche (mesure expérimentale donnée ou déduite d'un document joint, simulation numérique, etc.). Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue. ...
Communiquer.	Présenter la solution ou la rédiger, en expliquant le raisonnement et les résultats. ...

3. Approches documentaires

Pour chaque partie du programme, un certain nombre **d'approches documentaires** sont suggérées dans les paragraphes introductifs des parties concernées.

Ces activités permettent :

- d'habituer les étudiants, dans la perspective d'une formation tout au long de la vie, à se cultiver en utilisant des documents variés (texte, schéma, graphe, vidéo, photo, etc.), démarche dans laquelle ils sont acteurs de leur formation ;
- d'acquérir des éléments de culture (construction du savoir scientifique, histoire des sciences, étapes d'une démarche scientifique, raisonnements, ordres de grandeurs, avancée de la recherche sur des sujets contemporains, ouverture sur les problèmes sociétaux...) dans les domaines de la physique et de la chimie des ^{xx^e} et ^{xxi^e} siècles et de leurs applications ;
- de mobiliser et de développer des compétences liées à la recherche, à l'extraction, à l'organisation, à l'analyse et à la synthèse de l'information recueillie ou fournie, compétences essentielles pour les futurs ingénieurs et chercheurs scientifiques. Ces compétences et des exemples de capacités associées sont présentés dans le tableau ci-dessous. Elles peuvent servir de support pour la formation et l'évaluation des étudiants.

À l'issue de l'activité documentaire, une synthèse finale est indispensable pour bien identifier les nouvelles connaissances, parfois les nouveaux modèles et les éléments de culture générale que les étudiants doivent s'approprier.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	- dégager la problématique principale - acquérir de nouvelles connaissances en autonomie - identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau, etc.)
Analyser	- identifier les idées essentielles et leurs articulations - relier qualitativement ou quantitativement différents éléments du ou des documents - identifier une tendance, une corrélation, une grandeur d'influence - conduire un raisonnement scientifique qualitatif ou quantitatif - s'appuyer sur ses connaissances et savoir-faire et sur les documents proposés pour enrichir l'analyse
Réaliser	- extraire une information d'un texte, d'un graphe, d'un tableau - trier et organiser des données, des informations - tracer un graphe à partir de données - schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure, etc. - décrire un phénomène à travers la lecture d'un graphe, d'un tableau, etc.

	<ul style="list-style-type: none"> - conduire une analyse dimensionnelle - utiliser un modèle décrit
Valider	<ul style="list-style-type: none"> - faire preuve d'esprit critique - confronter le contenu du document avec ses connaissances et savoir-faire - repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude, etc.) - estimer des ordres de grandeur et procéder à des tests de vraisemblance
Communiquer à l'écrit comme à l'oral	<ul style="list-style-type: none"> - rédiger/présenter une synthèse, une analyse, une argumentation, etc. (clarté, justesse, pertinence, exhaustivité, logique) - résumer un paragraphe sous la forme d'un texte, d'un schéma, d'une carte mentale - illustrer son propos par des schémas, des graphes, des développements mathématiques

Partie 2 – Démarche de projet et formation expérimentale

Les techniques expérimentales étant maîtrisées, les étudiants en ATS métiers de la chimie réinvestissent leurs compétences et mobilisent leurs acquis théoriques dans une démarche de **projet**. Cette activité leur permet de montrer leur capacité à collecter les informations nécessaires, à proposer et mettre en œuvre en autonomie une démarche expérimentale raisonnée et à mener une analyse critique des résultats expérimentaux et de la démarche retenue. L'ensemble des capacités expérimentales que les étudiants doivent avoir acquises en chimie durant leur parcours antérieur sont regroupées en trois domaines : prévention du risque au laboratoire, mesure de grandeurs physiques - analyse quantitative et synthèses organiques et inorganiques.

Les étudiants en parcours génie des procédés ne maîtrisent pas certaines des techniques listées ci-dessous (et marquées d'un astérisque *), mais peuvent être amenés à les mettre en œuvre dans le cadre de la démarche de projet.

1. Prévention du risque au laboratoire de chimie

Les étudiants ont conscience du risque lié à la manipulation et au rejet des produits chimiques. Le respect des règles de sécurité leur permet de prévenir et de minimiser ce risque. En tant que techniciens supérieurs, ils ont été sensibilisés à la fois au risque d'impact de leur activité sur l'environnement et au respect de la législation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Prévention des risques - chimique Règles de sécurité au laboratoire. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Phrases H et P. - électrique	Adopter une attitude adaptée au travail en laboratoire. Relever les indications sur le risque associé au prélèvement et au mélange des produits chimiques. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques. Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
2. Impact environnemental Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

2. Mesures de grandeurs physiques- Analyse quantitative

Les étudiants maîtrisent les techniques de mesure de masse, pH, conductivité, absorbance, pouvoir rotatoire, indice de réfraction, température mais aussi des techniques plus sophistiquées telles que la chromatographie phase gaz (CPG)*, la chromatographie liquide haute performance (HPLC)*.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Mesures de : - volume ; - masse ; - pH ; - conductance et conductivité ;	Sélectionner et utiliser le matériel adapté à la précision requise. Préparer une solution aqueuse de concentration donnée à partir d'un solide, d'un liquide, d'une solution de concentration molaire connue ou d'une solution de titre massique et de densité connus. Utiliser les méthodes et le matériel adéquats pour transférer l'intégralité du solide ou du liquide pesé.

<ul style="list-style-type: none"> - tension ; - intensité du courant électrique ; - température ; - pouvoir rotatoire ; - indice de réfraction ; - absorbance. 	<p>Distinguer les instruments de verrerie In et Ex.</p> <p>Utiliser les appareils de mesure (masse, pH, conductance, tension, intensité, température, indice de réfraction, absorbance, pouvoir rotatoire) en s'aidant d'une notice.</p> <p>Mettre en œuvre des mesures calorimétriques à pression constante.</p> <p>Choisir les électrodes adaptées à une mesure électrochimique.</p> <p>Construire un dispositif électrochimique à partir de sa représentation symbolique.</p> <p>Étalonner une chaîne de mesure si nécessaire.</p> <p>Tracer des courbes intensité-potentiel*.</p> <p>Tracer des spectres UV.</p> <p>Tracer et analyser des spectres IR*.</p> <p>Analyser des spectres RMN du proton*.</p>
---	---

Pour pratiquer une démarche expérimentale autonome et raisonnée, les étudiants doivent posséder de solides connaissances et savoir-faire dans le domaine des mesures et des incertitudes : celles-ci interviennent aussi bien en amont au moment de l'analyse du protocole, du choix des instruments de mesure, etc., qu'en aval lors de la validation et de l'analyse critique des résultats obtenus. Ils ont grâce à leur parcours antérieur acquis le vocabulaire de base de la métrologie, et connaissent la loi des incertitudes composées. Ils ont conscience de la variabilité des résultats obtenus lors d'un processus de mesure, cherchent à en connaître les origines.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Erreur ; composante aléatoire et composante systématique de l'erreur.	Utiliser le vocabulaire de base de la métrologie : mesurage, valeur vraie, grandeur d'influence, erreur aléatoire, erreur systématique. Identifier les sources d'erreurs lors d'une mesure.
Notion d'incertitude, incertitude-type. Évaluation d'une incertitude-type. Incertitude-type composée.	Savoir que l'incertitude est un paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées à la grandeur mesurée. Procéder à l'évaluation de type A de l'incertitude-type (incertitude de répétabilité). Procéder à l'évaluation de type B de l'incertitude-type dans des cas simples (instruments gradués) ou à l'aide de données fournies par le constructeur (résistance, multimètre, oscilloscope, thermomètre, verrerie...).
Incertitude élargie.	Évaluer l'incertitude-type d'une mesure obtenue à l'issue de la mise en œuvre d'un protocole présentant plusieurs sources d'erreurs indépendantes dans les cas simples d'une expression de la valeur mesurée sous la forme d'une somme, d'une différence, d'un produit ou d'un quotient ou bien à l'aide d'une formule fournie ou d'un logiciel. Comparer les incertitudes associées à chaque source

	<p>d'erreurs.</p> <p>Associer un niveau de confiance de 95 % à une incertitude élargie.</p>
<p>Présentation d'un résultat expérimental.</p> <p>Acceptabilité du résultat et analyse du mesurage (ou processus de mesure).</p>	<p>Exprimer le résultat d'une mesure par une valeur et une incertitude associée à un niveau de confiance.</p> <p>Commenter qualitativement le résultat d'une mesure en le comparant, par exemple, à une valeur de référence.</p> <p>Analyser les sources d'erreurs et proposer des améliorations du processus de mesure.</p>
<p>Vérification d'une loi physique ou validation d'un modèle ; ajustement de données expérimentales à l'aide d'une fonction de référence modélisant le phénomène.</p>	<p>Utiliser un logiciel de régression linéaire.</p> <p>Connaître la signification du coefficient de corrélation.</p> <p>Juger qualitativement si des données expérimentales avec incertitudes sont en accord avec un modèle linéaire.</p> <p>Extraire à l'aide d'un logiciel les incertitudes sur la pente et sur l'ordonnée à l'origine dans le cas de données en accord avec un modèle linéaire.</p>

De même l'outil informatique a été largement utilisé dans leur formation antérieure notamment :

- pour l'acquisition de données, en utilisant un appareil de mesure interfacé avec l'ordinateur ;
- pour la saisie et le traitement de données à l'aide d'un tableur ou d'un logiciel dédié.

3. Synthèses organiques et inorganiques

Les étudiants maîtrisent expérimentalement les différentes techniques à mettre en œuvre dans les synthèses : réalisation des montages et utilisation des appareillages.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Transformation chimique</p> <p>Transformations à chaud, à froid, à température ambiante.</p> <p>Transformation en milieu anhydre*.</p> <p>Suivi de l'évolution de la transformation.</p>	<p>Choisir la verrerie adaptée à la transformation réalisée et aux conditions opératoires mises en œuvre.</p> <p>Réaliser le ou les montages appropriés et en expliquer le principe et l'intérêt.</p> <p>Choisir ou justifier l'ordre d'introduction des réactifs.</p> <p>Mettre en œuvre une synthèse organométallique.</p> <p>Réaliser et réguler une addition au goutte à goutte.</p> <p>Utiliser le moyen de chauffage ou de refroidissement adéquat.</p> <p>Suivre et contrôler l'évolution de la température dans le réacteur.</p> <p>Choisir un moyen approprié pour réguler une éventuelle ébullition.</p> <p>Utiliser un réfrigérant à reflux, contrôler et réguler le reflux.</p> <p>Mettre en œuvre des méthodes permettant de suivre qualitativement ou quantitativement l'avancement de la transformation.</p>
<p>Séparation et purification</p> <p>Séparation de deux liquides non miscibles.*</p>	<p>Choisir ou justifier un protocole de séparation ou de purification d'un produit, sur la base de données fournies ou issues d'observations et/ou de mesures expérimentales.</p> <p>Réaliser une extraction liquide-liquide.</p> <p>Identifier la nature des phases dans une ampoule à décanter.</p> <p>Distinguer extraction et lavage d'une phase.</p>

Séparation de deux espèces dissoutes dans une phase liquide.	Élaborer et mettre en œuvre un protocole de séparation de deux espèces dissoutes dans une phase liquide.
Distillations.	Mettre en œuvre différents types de distillation. Choisir ou proposer la méthode la plus adaptée au système étudié. Expliquer l'intérêt de l'évaporateur rotatif.
Séparation d'un liquide et d'un solide.	Réaliser et mettre en œuvre une filtration simple, une filtration sous pression réduite. Choisir et justifier la méthode de filtration adaptée au système étudié.
Lavage d'un solide.	Réaliser et justifier les différentes étapes du lavage d'un solide : ajout du solvant de lavage froid ou saturé, trituration, essorage. Expliquer et mettre en œuvre la technique de recristallisation.
Recristallisation d'un solide*.	Justifier à l'aide de données pertinentes et/ou par l'observation le choix d'un solvant de recristallisation et la quantité mise en œuvre.
Séchage d'un solide.	Mettre en œuvre « une pesée à masse constante » d'un solide humide.
Séchage d'un liquide*.	Choisir un desséchant solide et estimer correctement par l'observation la quantité à utiliser.
Rendement.	À partir d'une mesure appropriée, déterminer le rendement d'une synthèse, d'une méthode de séparation.

Utilisation de l'outil informatique

L'outil informatique sera utilisé :

- dans le domaine de la simulation : pour interpréter et anticiper des résultats ou des phénomènes, chimiques, pour comparer des résultats obtenus expérimentalement à ceux fournis par un modèle et pour visualiser des modèles de description de la matière. Les domaines d'activité qui se prêtent particulièrement à la simulation sont : les titrages en solution aqueuse, la cinétique chimique, la cristallographie, la modélisation moléculaire, l'approche orbitale. Cette liste n'est bien entendu pas exhaustive et l'usage de toutes les animations numériques qui facilitent l'apprentissage est recommandé ;
- pour l'acquisition de données, en utilisant un appareil de mesure interfacé avec l'ordinateur ;
- pour la saisie et le traitement de données à l'aide d'un tableur ou d'un logiciel dédié.

Partie 3 - Formation disciplinaire

La formation disciplinaire en chimie en classe d'ATS métiers de la chimie complète celle reçue pendant les deux années d'études antérieures en STS ou IUT, dans trois domaines larges que sont architecture de la matière, thermodynamique et cinétique et chimie organique. Elle s'inscrit dans une vision rénovée de l'enseignement de la chimie, privilégiant la capacité de l'étudiant à raisonner, à prévoir et à transposer ses connaissances dans des situations nouvelles ou sur des composés proches de ceux étudiés, plutôt que sa capacité à réciter, à reproduire. Ainsi le programme est structuré autour des outils du raisonnement que sont les théories et les modèles de comportement macroscopique ou microscopique et non pas autour d'une présentation encyclopédique, systématique, des composés et des réactions associées (acides, bases, complexes, précipités, alcènes, alcools, etc.). Il s'agit bien de changer l'image parfois véhiculée de la chimie, d'une discipline où l'apprentissage par cœur serait le moteur de la réussite, et de montrer qu'elle est une science où la dialectique entre savoirs et méthodes permet d'aborder des situations nouvelles, de construire de nouvelles connaissances.

Ainsi formés en chimie, futurs ingénieurs ou chercheurs scientifiques pourront accompagner l'innovation, moteur de la croissance de demain, que ce soit dans le cadre de la recherche et du développement mais aussi de la production au stade industriel.

L'ordre de présentation des contenus, tel que présenté ci-dessous, n'est pas nécessairement celui qui doit être adopté par le professeur ; celui-ci dispose de toute liberté pour effectuer des choix et établir sa propre progression annuelle dont le seul objectif reste de permettre l'acquisition par tous les étudiants de l'ensemble des capacités exigibles. Un travail en collaboration avec le professeur de physique est vivement recommandé afin de favoriser les apprentissages sur les domaines communs étudiés dans les deux disciplines.

Le programme de chimie organique à destination des étudiants ayant choisi le parcours génie des procédés est réduit, en cohérence avec la réduction de l'horaire de cours correspondant, et figure en partie III-bis.

Partie I : Architecture de la matière

A. Atomes et édifices polyatomiques : modélisation et réactivité

Décrivant la matière au niveau macroscopique par des espèces chimiques aux propriétés physiques et chimiques caractéristiques, le chimiste la modélise au niveau microscopique par des entités chimiques dont la structure électronique permet de rendre compte et de prévoir diverses propriétés. L'étude proposée dans cette partie du programme est en partie centrée sur la classification périodique des éléments, outil essentiel du chimiste, dans l'objectif de développer les compétences relatives à son utilisation : extraction des informations qu'elle contient, prévision de la réactivité des corps simples, prévision de la nature des liaisons chimiques dans les corps composés, etc.

Les différents modèles de description des atomes et entités chimiques à l'échelle microscopique permettent d'interpréter à la fois leurs propriétés structurales et leurs réactivités. La réactivité en chimie organique sera abordée dans le cadre de l'approximation des orbitales frontalières.

Les étudiants dans le cadre de leurs deux années d'études supérieures post baccalauréat ont abordé la plupart des modèles présentés. Il s'agit là encore de mobiliser leurs acquis afin de les conforter et de continuer à affiner les modèles de description des molécules et de la liaison chimique.

Les objectifs de cette partie, au-delà de la consolidation des connaissances antérieures, sont les suivants :

- la construction de diagrammes d'orbitales moléculaires ou leur interprétation en vue de la prévision de la réactivité d'une entité chimique (molécule, ion ou radical) ;
- l'exploitation de diagrammes d'orbitales moléculaires de complexes de métaux de transition dans le but d'interpréter les propriétés des liaisons dans ce type d'édifices et l'utilisation de ces complexes comme catalyseurs ou éléments structurants.

Les approximations usuelles de la théorie des orbitales atomiques et moléculaires seront présentées afin de mettre l'accent sur les limitations des modèles adoptés. La notion de fonction d'onde sera abordée sans qu'aucune formulation mathématique ne soit exigible.

La construction des diagrammes d'orbitales moléculaires est limitée aux cas des molécules A_2 ou AB , sans mélange d'orbitales s et p. En revanche, des diagrammes d'orbitales moléculaires avec mélanges d'orbitales atomiques sur un même centre peuvent être fournis, l'étudiant devant alors les interpréter : remplissage des niveaux, identification des orbitales frontalières HO et BV, analyse du caractère liant, antiliant ou non liant d'une orbitale moléculaire. De même, la construction des diagrammes d'orbitales moléculaires de systèmes plus complexes est hors programme ; l'étudiant interprète ces diagrammes à partir des propriétés de deux fragments en interaction dont les orbitales sont fournies.

Les orbitales moléculaires des complexes à symétrie octaédrique sont interprétées de la même manière.

Dans le but de disposer de modèles simples applicables en chimie organique, l'approximation des orbitales frontalières permet de prévoir la réactivité électrophile ou nucléophile des espèces mises en jeu : ces orbitales peuvent être obtenues grâce à des logiciels ou à partir de bases de données, les unités d'énergie utilisables étant l'eV ou le $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

La catalyse par les complexes des métaux de transition trouve de très nombreuses applications comme par exemple la réaction de Heck en chimie fine, la carbonylation du méthanol en chimie industrielle, les processus de respiration et de photosynthèse en chimie du vivant. Elle s'inscrit dans la démarche de la chimie verte et permet des synthèses dans des conditions douces. La compréhension de ces systèmes catalytiques nécessite l'analyse détaillée de la structure électronique des complexes par l'utilisation des orbitales atomiques et moléculaires. Aucun cycle catalytique n'est exigible, mais les étapes élémentaires d'un cycle fourni doivent être reconnues par l'étudiant, les notions de cinétique pouvant être réinvesties à cette occasion. Le formalisme de Green est hors-programme.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- utiliser la classification périodique des éléments pour déterminer, justifier ou comparer des propriétés physico-chimiques (oxydo-réduction, solubilité, aptitude à la complexation, polarité, polarisabilité, etc.) ;
- utiliser différentes représentations schématiques ou symboliques d'une entité ;
- s'approprier les outils de description des entités chimiques (liaison covalente, notion de nuage électronique...) et leur complémentarité dans la description des interactions intermoléculaires ;
- appréhender la notion de solvant, au niveau microscopique à travers les interactions intermoléculaires et au niveau macroscopique par leur utilisation au laboratoire, dans l'industrie et dans la vie courante ;
- comparer les apports et limites des différents modèles de description des entités chimiques ;
- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques à l'aide de différents modèles ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif à partir de représentations graphiques.

Approches documentaires possibles :

- à partir de documents impliquant des transformations en chimie bio-inorganique, analyser le rôle catalytique ou structurant des complexes métalliques ;
- à partir de documents illustrant l'existence de bandes d'énergie dans les solides, analyser les propriétés de conduction électrique de matériaux.

Approches numériques possibles :

- utiliser l'outil informatique pour représenter les orbitales en 3D ;
- utiliser un logiciel de modélisation pour l'obtention d'orbitales moléculaires en vue d'une interprétation de la réactivité.

1- L'atome et la classification périodique des éléments

Notions et contenus	Capacités exigibles
Isotopes, abondance isotopique, stabilité. Ordres de grandeur de la taille d'un atome, des masses et des charges de l'électron et du noyau.	Utiliser un vocabulaire précis : élément, atome, corps simple, espèce chimique, entité chimique.
Quantification de l'énergie et spectroscopies (UV-Visible, IR, RMN).	Associer un type de transition énergétique au domaine du spectre électromagnétique correspondant. Déterminer la longueur d'onde d'une radiation émise ou absorbée à partir de la valeur de la transition énergétique mise en jeu, et inversement.
Fonctions d'onde de l'atome d'hydrogène. Nombres quantiques n , l , m_l .	Interpréter $ \psi ^2$ comme la densité de probabilité de présence d'un électron en un point et le relier à la densité de charge.
Énergie et rayon associés à une orbitale atomique.	Prévoir qualitativement, pour l'atome d'hydrogène et les ions hydrogénoïdes, l'évolution du rayon et de l'énergie associés à une orbitale atomique en fonction du nombre quantique principal.
Représentation graphique conventionnelle d'une orbitale atomique.	Identifier la phase de la fonction d'onde.
Orbitales des atomes polyélectroniques ; énergie associée à une orbitale, dégénérescence des niveaux d'énergie. Notion qualitative de charge effective. Nombre quantique m_s . Électrons de cœur et de valence.	Dessiner l'allure des orbitales atomiques s, p et d.
Architecture et lecture du tableau périodique.	Établir la configuration électronique d'un atome ou d'un ion dans son état fondamental (la connaissance des exceptions à la règle de Klechkowski n'est pas exigible). Déterminer le nombre d'électrons non appariés d'un atome dans son état fondamental. Prévoir la formule des ions monoatomiques d'un élément. Relier l'évolution du rayon associé à une orbitale atomique à la charge effective.
Électronégativité.	Relier la position d'un élément dans le tableau périodique à la configuration électronique et au nombre d'électrons de valence de l'atome correspondant. Positionner dans le tableau périodique et reconnaître les métaux et non métaux. Situer dans le tableau les familles suivantes : métaux alcalins et alcalino-terreux, halogènes et gaz nobles. Citer les éléments des périodes 1 à 3 de la classification et de la colonne des halogènes (nom, symbole, numéro atomique).
	Relier le caractère oxydant ou réducteur d'un corps simple à l'électronégativité de l'élément. Comparer l'électronégativité de deux éléments selon leur position

<p>Rayon atomique. Rayon ionique. Polarisabilité.</p>	<p>dans le tableau périodique. Relier l'évolution de l'énergie associée à une orbitale atomique à l'électronégativité.</p> <p>Interpréter l'évolution du rayon atomique dans la classification périodique en utilisant la notion qualitative de nombre de charge effectif. Interpréter la différence de valeur entre le rayon d'un atome et le rayon de ses ions. Relier le rayon associé aux orbitales de valence d'un atome à sa polarisabilité.</p>
---	--

2- Description des édifices polyatomiques et de leurs interactions

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Modèle de Lewis Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Liaison covalente localisée et délocalisée. Ordres de grandeur de la longueur et de l'énergie d'une liaison covalente.</p> <p>Structure géométrique d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Méthode VSEPR.</p> <p>Liaison polarisée. Molécule polaire. Moment dipolaire.</p>	<p>Établir un ou des schémas de Lewis pour une entité donnée et identifier éventuellement le plus représentatif. Identifier les écarts à la règle de l'octet. Identifier les enchaînements donnant lieu à délocalisation électronique. Mettre en évidence une éventuelle délocalisation électronique à partir de données expérimentales.</p> <p>Représenter les structures de type AX_n, avec $n \leq 6$. Prévoir ou interpréter les déformations angulaires pour les structures de type AX_pE_q, avec $p+q = 3$ ou 4.</p> <p>Relier la structure géométrique d'une molécule à l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une molécule ou d'une liaison.</p>
<p>Forces intermoléculaires Interactions de van der Waals. Liaison hydrogène. Ordres de grandeur énergétiques.</p>	<p>Lier qualitativement la valeur plus ou moins grande des forces intermoléculaires à la polarité et la polarisabilité des molécules. Prévoir ou interpréter les propriétés liées aux conformations ou aux propriétés spectroscopiques d'une espèce. Prévoir ou interpréter les propriétés physiques de corps purs par l'existence d'interactions de van der Waals ou de liaisons hydrogène inter ou intramoléculaires.</p>
<p>Les solvants moléculaires Grandeurs caractéristiques : moment dipolaire, permittivité relative. Solvants protogènes (protiques). Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.</p>	<p>Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Relier une valeur fournie de constante de partage aux structures moléculaires de l'espèce solvatée et des solvants concernés.</p>
<p>Modèle quantique Méthode de combinaison linéaire des orbitales atomiques.</p> <p>Interaction de deux orbitales atomiques sur deux centres :</p> <ul style="list-style-type: none"> - recouvrement ; - orbitales liante, antiliante, non liante ; - énergie d'une orbitale moléculaire ; - orbitale σ, orbitale π. 	<p>Identifier les conditions d'interaction de deux orbitales atomiques : recouvrement et critère énergétique.</p> <p>Construire des orbitales moléculaires de molécules diatomiques par interaction d'orbitales atomiques du même type (s-s, p-p).</p> <p>Reconnaître le caractère liant, antiliant, non liant d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Identifier la symétrie σ ou π d'une orbitale moléculaire à partir de sa</p>

<p>Représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire par schématisation graphique de la combinaison linéaire des orbitales atomiques.</p> <p>Diagramme d'orbitales moléculaires : occupation, orbitales frontalières haute occupée et basse vacante, cas des entités radicalaires.</p> <p>Ordre de liaison dans les molécules diatomiques.</p> <p>Interaction d'orbitales de fragments.</p>	<p>représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Proposer une représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire tenant compte d'une éventuelle dissymétrie du système. Justifier la dissymétrie d'une orbitale moléculaire obtenue par interaction d'orbitales atomiques centrées sur des atomes d'éléments différents.</p> <p>Prévoir l'ordre énergétique des orbitales moléculaires et établir qualitativement un diagramme énergétique d'orbitales d'une molécule diatomique.</p> <p>Décrire l'occupation des niveaux d'un diagramme d'orbitales moléculaires. Identifier les orbitales frontalières à partir d'un diagramme d'orbitales moléculaires de valence fourni.</p> <p>Relier dans une molécule diatomique l'évolution de la longueur et de la constante de force de la liaison à l'évolution de l'ordre de liaison.</p> <p>Justifier l'existence d'interactions entre orbitales de fragment en termes de recouvrement ou d'écart d'énergie. Interpréter un diagramme d'orbitales moléculaires obtenu par interaction des orbitales de deux fragments, fournies.</p>
<p>Orbitales moléculaires et réactivité</p> <p>Prévision de la réactivité : approximation des orbitales frontalières.</p>	<p>Utiliser les orbitales frontalières pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - prévoir la réactivité nucléophile ou électrophile d'une entité (molécule ou ion) ; - comparer la réactivité de deux entités ; - interpréter des résultats expérimentaux (régiosélectivité, stéréochimie).

3- Les complexes. Application à l'activité catalytique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Orbitales moléculaires de valence des complexes métalliques octaédriques : interactions entre fragments pour des ligands σ-donneurs intervenant par une seule orbitale.</p> <p>Ligands π-donneurs et π-accepteurs. Coordination des systèmes π non délocalisés.</p> <p>Cycles catalytiques.</p> <p>Processus élémentaires : addition oxydante, insertion et processus inverses.</p>	<p>Identifier parmi les orbitales de fragments fournies celles qui interagissent.</p> <p>Expliquer la levée partielle de dégénérescence des orbitales d.</p> <p>Établir la configuration électronique de valence d'un complexe dont le diagramme d'orbitales est donné. Reconnaître un ligand ayant des effets π à partir de la donnée de ses orbitales de valence.</p> <p>Identifier les interactions orbitales possibles entre orbitales atomiques d d'un métal et le système π d'un alcène ou d'un ligand carbonyle.</p> <p>Expliquer par une approche orbitale la coordination des systèmes π sur un fragment métallique donné.</p> <p>Établir l'équation de réaction à partir d'un cycle catalytique donné. Distinguer catalyseur et précurseur de catalyseur.</p> <p>Déterminer la variation du nombre d'oxydation d'un métal au sein d'un complexe au cours d'une étape élémentaire d'un cycle donné. Reconnaître les étapes élémentaires d'un mécanisme donné. Donner le produit d'un acte élémentaire dont les réactifs sont</p>

précisés.

Interpréter la modification de réactivité d'un alcène par les phénomènes électroniques mis en jeu lors de sa coordination.

B. Architecture de la matière condensée : solides cristallins

Les éléments de description microscopique relatifs au « modèle du cristal parfait » sont introduits sur l'exemple de la maille cubique faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible. Cet ensemble d'outils descriptifs sera réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution sera alors fournie à l'étudiant.

Aucune connaissance de mode de cristallisation pour une espèce donnée n'est exigible ; le professeur est libre de choisir les exemples de solides pertinents pour présenter les différents types de cristaux et montrer leur adéquation, plus ou moins bonne, avec le modèle utilisé.

En effet, l'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites avec ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (rayons ioniques, masse volumique). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans la classification périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- relier la position d'un élément dans le tableau périodique et la nature des interactions des entités correspondantes dans un solide ;
- effectuer des liens entre différents champs de connaissance ;
- appréhender la notion de limite d'un modèle.

Approche documentaire possible : à partir de documents autour des défauts cristallins, aborder leur nature et leurs conséquences sur les propriétés du matériau.

Approche numérique : utiliser un logiciel pour visualiser des mailles et des sites interstitiels et pour déterminer des paramètres géométriques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Les divers états solides Solides cristallins - solides amorphes. Notion de polymorphisme.</p>	<p>Identifier un phénomène d'allotropie dans les divers types de cristaux, notamment métalliques, covalents et moléculaires.</p>
<p>Modèle du cristal parfait Description du cristal parfait ; population, coordinence, compacité, masse volumique. Limites du modèle du cristal parfait.</p>	<p>Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie. Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée. Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.</p>
<p>Métaux et cristaux métalliques Description des modèles d'empilement compact de sphères identiques. Maille conventionnelle cubique à faces centrées (CFC) et ses sites interstitiels. Alliages de substitution et d'insertion.</p>	<p>Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement. Localiser, dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité. Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux. Citer des exemples d'alliage et leur intérêt par rapport à des métaux</p>

	purs. Prévoir la possibilité de réaliser des alliages de substitution ou d'insertion selon les caractéristiques des atomes mis en jeu.
Solides macrocovalents et moléculaires	Identifier les liaisons covalentes, les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène dans un cristal de structure donnée. Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants. Comparer les propriétés macroscopiques du diamant et du graphite et interpréter les différences en relation avec les structures microscopiques (structures cristallines fournies).
Solides ioniques	Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques. Vérifier la tangence anion-cation et la non tangence anion-anion dans une structure cubique de type AB fournie, à partir des valeurs du paramètre de maille et des rayons ioniques.

Partie II : Mélanges et transformations : thermodynamique et cinétique

La chimie est une science de la nature, science de la matière et de sa transformation.

Les différents états de la matière et les différents types de transformation de la matière sont des notions maintes fois rencontrées par l'étudiant en classe d'ATS lors de son parcours antérieur. Il s'agit de réactiver et de compléter ces connaissances déjà acquises, afin d'amener les étudiants à les mobiliser de manière autonome pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution.

L'importance du facteur temporel dans la description de l'évolution d'un système chimique apparaît dans l'observation du monde qui nous entoure et a déjà fait l'objet d'approches qualitatives et quantitatives, alliant réalisations expérimentales et confrontation des résultats aux modèles utilisés. La modélisation au niveau microscopique d'une transformation chimique par un mécanisme réactionnel complète l'étude cinétique macroscopique de la réaction chimique et permet d'aborder la notion de catalyse ; des exemples de catalyses homogènes, hétérogènes et enzymatiques seront rencontrés tout au long de la formation.

Au laboratoire, comme dans l'industrie, les chimistes sont amenés à élaborer des composés à partir de matières premières ou à séparer les espèces contenues dans un mélange réactionnel ou dans des substances naturelles. Dans les deux cas, l'innovation comme l'optimisation des techniques et des procédés s'appuient notamment sur des fondements thermodynamiques. La thermodynamique permet en effet de prévoir si la transformation envisagée est possible ou non et de trouver d'éventuelles pistes d'amélioration du rendement. Elle permet aussi d'appréhender les propriétés physico-chimiques des mélanges et d'envisager une voie d'accès aux corps purs. Elle contribue ainsi à l'obtention de matériaux de plus en plus complexes et répondant à des cahiers des charges de plus en plus exigeants. Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- l'exploitation des diagrammes isobares de mélanges binaires construits à partir des courbes d'analyse thermique ;
- l'application des deux principes de la thermodynamique à la transformation physico-chimique ;
- la description thermodynamiques de transformations en solutions aqueuses (acido-basicité, complexation, précipitation)
- la description thermodynamique et cinétique des systèmes sièges de transformations électrochimiques.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- faire preuve de rigueur dans la description d'un système physico-chimique ;
- distinguer modélisation d'une transformation (écriture de l'équation de réaction) et description quantitative de l'évolution d'un système prenant en compte les conditions expérimentales choisies pour réaliser la transformation ;
- exploiter les outils de description des systèmes chimiques pour modéliser leur évolution temporelle ;
- proposer des approximations simplifiant l'exploitation quantitative de données expérimentales et en vérifier la

- pertinence ;
- modéliser un système réel et confronter le modèle à des mesures expérimentales ;
- établir un bilan thermique ;
- confronter des grandeurs calculées ou tabulées à des mesures expérimentales ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif ou quantitatif à partir de représentations graphiques.

Approches documentaires possibles :

- à partir de documents autour des radionucléides, aborder par exemple les problématiques liées à leur utilisation, leur stockage ou leur retraitement ;
- à partir de documents sur la pression osmotique, discuter de l'influence de la pression sur le potentiel chimique et des applications de cette propriété au laboratoire, en industrie ou dans le vivant.
- à partir de documents autour du traitement d'effluents, dégager par exemple les méthodes de détection d'espèces (méthodes physiques ou chimiques), d'évaluation des concentrations, de valeurs limites acceptables ou les procédés et transformations mis en jeu pour la séparation des espèces et la dépollution.
- à partir de documents relatifs à la corrosion humide, identifier et analyser les facteurs d'influence et les méthodes de protection.

Approche numérique possible :

- utiliser les résultats d'une méthode numérique pour mettre en évidence les approximations de l'étape cinétiquement déterminante ou de l'état quasi-stationnaire.

A. Évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Système physico-chimique</p> <p>Constituants physico-chimiques.</p> <p>Corps purs et mélanges : concentration molaire, fraction molaire, pression partielle.</p> <p>Composition d'un système physico-chimique.</p>	<p>Recenser les constituants physico-chimiques présents dans un système.</p> <p>Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes.</p>
<p>Transformation chimique</p> <p>Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p>Équation de réaction.</p> <p>Avancement.</p> <p>Aspect thermodynamique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - constante thermodynamique d'équilibre ; - activité, quotient réactionnel, critère d'évolution ; - composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale. 	<p>Écrire l'équation de la réaction qui modélise une transformation chimique donnée.</p> <p>Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélanges de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient réactionnel. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique. Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction unique.</p>
<p>Vitesse de réaction en réacteur fermé de composition uniforme</p> <p>Vitesses de disparition d'un réactif et de formation d'un produit.</p> <p>Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent.</p> <p>Temps de demi-réaction.</p> <p>Temps de demi-vie d'un nucléide radioactif.</p>	<p>Relier la vitesse de réaction, dans les cas où elle est définie, à la vitesse de disparition d'un réactif ou de formation d'un produit.</p> <p>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</p> <p>Exprimer la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre et déterminer la valeur de la constante cinétique à une température donnée.</p> <p>Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode numérique ou graphique.</p> <p>Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou à l'aide des temps de demi-réaction.</p>

<p>Loi empirique d'Arrhenius ; énergie d'activation</p>	<p>Confirmer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant strictement à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p>Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.</p>
<p>Mécanismes réactionnels Actes élémentaires, molécularité, intermédiaire réactionnel, état de transition.</p> <p>Interprétation du rôle du catalyseur.</p> <p>Étape cinétiquement déterminante, approximation de l'état quasi-stationnaire (AEQS).</p>	<p>Distinguer l'équation chimique symbolisant une réaction chimique de l'équation traduisant un acte élémentaire. Distinguer un intermédiaire réactionnel d'un complexe activé (état de transition). Exprimer la loi de vitesse d'un acte élémentaire. Tracer un profil énergétique correspondant à un acte élémentaire ou à plusieurs actes élémentaires successifs. Reconnaître un effet catalytique dans un mécanisme réactionnel. Reconnaître les conditions d'utilisation de l'approximation de l'étape cinétiquement déterminante ou de l'état quasi-stationnaire. Établir la loi de vitesse de disparition d'un réactif ou de formation d'un produit à partir d'un mécanisme réactionnel simple en utilisant éventuellement les approximations classiques.</p>

B. Mélanges et transformations : aspects thermodynamiques

1- Changements d'état isobares de mélanges binaires

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - avec miscibilité totale à l'état liquide ; - avec miscibilité nulle à l'état liquide ; - avec miscibilité partielle à l'état liquide. <p>Diagrammes isobares d'équilibre solide-liquide :</p> <ul style="list-style-type: none"> - avec miscibilité totale à l'état solide ; - avec miscibilité nulle à l'état solide, avec ou sans composé défini à fusion congruente ; - avec miscibilité partielle à l'état solide. <p>Théorème des moments chimiques.</p> <p>Variance : nombre de degrés de liberté d'un système à l'équilibre.</p>	<p>Construire un diagramme isobare d'équilibre entre deux phases d'un mélange binaire à partir d'informations relatives aux courbes d'analyses thermiques.</p> <p>Décrire les caractéristiques des mélanges homoazéotropes, hétéroazéotropes, indifférents, eutectiques et des composés définis.</p> <p>Exploiter les diagrammes isobares d'équilibre entre deux phases pour, à composition en fraction molaire ou massique donnée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - tracer l'allure de la courbe d'analyse thermique en indiquant le nombre de degrés de liberté du système sur chaque partie de la courbe ; - déterminer les températures de début et de fin de changement d'état ; - donner la composition des phases en présence à une température T fixée ainsi que les quantités de matière ou les masses dans chaque phase. <p>Interpréter une distillation simple, une distillation fractionnée, une distillation hétéroazéotropique à l'aide des diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur.</p> <p>Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p>

2- Thermodynamique des transformations physico-chimiques

<p>Application du premier principe État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. Enthalpie standard de formation, état standard</p>	<p>Déterminer une enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess.</p>
--	---

<p>de référence d'un élément. Enthalpie standard de dissociation de liaison.</p> <p>Effets thermiques en réacteur monobare : - transfert thermique causé par la transformation chimique en réacteur isobare isotherme (relation $\Delta H = Q_p = \xi \Delta_r H^\circ$) ; - variation de température en réacteur adiabatique monobare.</p>	<p>Prévoir le sens du transfert thermique entre un système en transformation chimique et le milieu extérieur à partir de données thermodynamiques.</p> <p>Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique supposée isobare et réalisée dans un réacteur adiabatique.</p>
<p>Application du deuxième principe Identités thermodynamiques ; potentiel chimique. Relation de Gibbs-Helmholtz. Enthalpie libre.</p> <p>Expression du potentiel chimique dans des cas modèles de : - gaz parfaits ; - constituants condensés en mélange idéal ; - solutés infiniment dilués.</p> <p>Affinité chimique.</p> <p>Entropie molaire standard absolue. Entropie de réaction, enthalpie libre de réaction, grandeurs standard associées.</p> <p>Relation entre l'affinité chimique, $\Delta_r G^\circ$ et Q_r.</p> <p>L'équilibre physico-chimique. Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van't Hoff. Relation entre l'affinité chimique, K° et Q_r.</p> <p>Variance : nombre de degrés de liberté d'un système à l'équilibre.</p> <p>Optimisation d'un procédé chimique : - par modification de la valeur de K° ; - par modification de la valeur du quotient réactionnel.</p>	<p>Écrire les identités thermodynamiques pour les fonctions U, H et G. Distinguer et justifier les caractères intensif ou extensif des variables utilisées.</p> <p>Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques. Déterminer une variation d'enthalpie libre, d'enthalpie et d'entropie entre deux états du système chimique.</p> <p>Relier affinité chimique et création d'entropie lors d'une transformation d'un système physico-chimique. Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique dans un état donné à l'aide de l'affinité chimique.</p> <p>Justifier ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Déterminer une grandeur standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.</p> <p>Reconnaître si une variable intensive est ou non un facteur d'équilibre. Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p>Identifier les paramètres d'influence et déterminer leur sens d'évolution pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.</p>

C. Transformations chimiques en solutions aqueuses

1. Réactions acide-base, de complexation, de précipitation

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Réactions acido-basiques - constante d'acidité ; - diagramme de prédominance ; - exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature – faible ou forte – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, de la soude, la potasse, l'ion hydrogénocarbonate,</p>	<p>Identifier la nature des réactions en solutions aqueuses. Extraire, de ressources disponibles, les données thermodynamiques pertinentes pour prévoir qualitativement l'état final d'un système en solution aqueuse ou pour interpréter des observations expérimentales. Déterminer la valeur de la constante d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues.</p>

<p>l'ammoniac ; - solutions tampon.</p> <p>Réactions de complexation</p> <p>- constantes de formation ou de dissociation. - diagramme de prédominance en fonction de pL.</p> <p>Réactions de dissolution ou de précipitation</p> <p>- constante de l'équation de dissolution, produit de solubilité K_s ; - solubilité et condition de précipitation ; - domaine d'existence ; - facteurs influençant la solubilité.</p>	<p>Retrouver les valeurs de constantes d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement). Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique. Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution, en solide ou en gaz. Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité en fonction d'une variable.</p>
---	--

2. Réactions d'oxydoréduction

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Thermodynamique des réactions d'oxydoréduction</p> <p>Nombre d'oxydation. Exemples usuels : nom, nature et formule des ions thiosulfate, permanganate, dichromate, hypochlorite, du peroxyde d'hydrogène.</p> <p>Potentiel d'électrode, formule de Nernst, électrodes de référence.</p> <p>Diagrammes de prédominance ou d'existence.</p>	<p>Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple. Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrodes. Déterminer la capacité d'une pile.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p>
<p>Principe de construction d'un diagramme potentiel-pH.</p> <p>Lecture et utilisation des diagrammes potentiel-pH et potentiel pL.</p> <p>Limite thermodynamique du domaine d'inertie électrochimique l'eau.</p>	<p>Attribuer les différents domaines d'un diagramme fourni à des espèces données.</p> <p>Retrouver la valeur de la pente d'une frontière dans un diagramme potentiel-pH ou potentiel-pL. Justifier la position d'une frontière verticale. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes. Discuter de la stabilité des espèces dans l'eau. Prévoir la stabilité d'un état d'oxydation en fonction du pL ou du pH du milieu. Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation. Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.</p>
<p>Relation entre affinité chimique d'une réaction d'oxydoréduction et potentiels de Nernst des couples mis en jeu.</p>	<p>Déterminer des grandeurs standard de réaction par l'étude de piles.</p> <p>Énoncer la relation entre l'affinité chimique d'une réaction et les potentiels de Nernst des couples mis en jeu.</p> <p>Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydoréduction.</p>

<p>Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.</p> <p>Approche thermodynamique du fonctionnement d'une pile électrochimique.</p> <p>Irréversibilité et travail électrique maximum récupérable.</p>	<p>Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydoréduction à partir des potentiels standard des couples. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydoréduction à partir de données thermodynamiques (constantes d'équilibre, potentiels standard). Relier tension à vide d'une pile et enthalpie libre de réaction. Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique. Décrire et justifier le fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>
<p>Cinétique des réactions d'oxydoréduction Courbes courant-potential sur une électrode :</p> <ul style="list-style-type: none">- systèmes rapides et systèmes lents ;- surtension ;- nature de l'électrode ;- courant limite de diffusion ;- vagues successives ;- domaine d'inertie électrochimique du solvant. <p>Utilisation des courbes courant-potential.</p> <p>- Transformations spontanées :</p> <ul style="list-style-type: none">- notion de potentiel mixte ;- fonctionnement d'une pile électrochimique <p>- Transformations forcées :</p> <ul style="list-style-type: none">- électrolyseurs ;- accumulateurs.	<p>Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.</p> <p>Reconnaître le caractère lent ou rapide d'un système à partir de courbes courant-potential.</p> <p>Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion. Relier qualitativement, ou quantitativement à partir des courbes courant-potential, l'intensité du courant limite de diffusion à la concentration du réactif, au nombre d'électrons échangés et à la surface immergée de l'électrode.</p> <p>Tracer l'allure de courbes courant-potential à partir de données de potentiels standard, concentrations et surtensions « seuil ».</p> <p>Identifier les paramètres d'influence du domaine d'inertie électrochimique du solvant.</p> <p>Positionner un potentiel mixte sur un tracé de courbes courant-potential.</p> <p>Identifier piles, accumulateurs et électrolyseurs comme dispositifs mettant en jeu des conversions entre énergie chimique et énergie électrique.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potential pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et prévoir la valeur de la tension à vide.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potential pour rendre compte du fonctionnement d'un dispositif siège d'une électrolyse et prévoir la valeur de la tension de seuil.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potential pour justifier les contraintes dans la recharge d'un accumulateur.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne du dispositif électrochimique.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potential pour justifier la nécessité :</p> <ul style="list-style-type: none">- de purifier une solution électrolytique avant l'électrolyse ;- de choisir les électrodes permettant de réaliser l'électrolyse voulue.

Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.

Évaluer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse.

Partie III - Parcours chimie : synthèse organique

Médicaments, produits phytosanitaires, matériaux polymères de synthèse aussi différents que les latex de peinture ou les boucliers thermiques des véhicules spatiaux... Synthèses en chimie fine ou productions de fort tonnage découlent d'une démarche d'ingénierie moléculaire s'appuyant entre autres sur les apports de la chimie organique.

L'élaboration, l'identification des structures et la prévision de la réactivité des molécules obéissent à des règles fondamentales dont les principes sont abordés dans cette partie, dont l'objectif est à la fois de faire comprendre les enjeux et la logique de la synthèse organique et de décrire, d'analyser et de modéliser les transformations organiques à l'échelle microscopique.

Cela nécessite l'acquisition de compétences liées à la description géométrique des structures, à l'analyse de la réactivité des espèces et à la description des grands types de réactions. Ces notions sont présentées sur des exemples donnés, mais dans le but d'une maîtrise permettant un réinvestissement sur des situations analogues. Ainsi, une présentation par mécanismes ou de type fonctionnelle peut être envisagée, au libre choix de l'enseignant. Néanmoins, il s'agit de privilégier une approche mécanistique pour faire comprendre et maîtriser les raisonnements plutôt que pour empiler les connaissances.

L'enseignement de la chimie organique s'appuie sur les connaissances et capacités acquises en thermodynamique et cinétique chimiques et exploite les modèles orbitaux de description des structures et de la réactivité, introduits dans la partie « Architecture de la matière ». D'une part, l'utilisation des orbitales frontalières permet la prévision des géométries d'approche des réactifs et, dans le cas où l'évolution du système est sous contrôle frontalier, la prévision de la structure du produit majoritaire dans la transformation. D'autre part, l'étude de quelques cycles catalytiques permet de construire ou de réinvestir les compétences relatives aux complexes de métaux de transition. Aucune étude des propriétés intrinsèques des ligands carbène impliqués dans les réactions de métathèse n'est à envisager. Lors des épreuves d'évaluation, les orbitales frontalières comme les différentes étapes des cycles catalytiques sont systématiquement fournies aux étudiants.

Le cours et les activités s'appuient sur des exemples issus aussi bien des domaines de la chimie fine, de la chimie du vivant et de la chimie industrielle et permettent une sensibilisation aux principes de la chimie verte.

À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques ;
- maîtriser et utiliser différentes représentations schématiques d'un objet ;
- relier les grandeurs spectroscopiques à la structure de l'espèce chimique étudiée.
- choisir le ou les modèle(s) pertinent(s) de description géométrique, électronique ou orbitale d'une espèce chimique pour rendre compte de sa réactivité ;
- identifier dans une entité complexe la partie utile au raisonnement ;
- utiliser des modèles de prédiction de l'évolution du système dans le cadre des transformations proposées ;
- pratiquer un raisonnement par analogie (analyse de réactivités et écriture de mécanismes) ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer un schéma de synthèse ;
- proposer une stratégie de synthèse dans le cadre d'un problème ouvert.

Approches documentaires possibles :

- à partir de documents, identifier différents modes de protection/déprotection du groupe hydroxyle impliquant notamment des éthers silylés ;
- à partir de documents relatifs à la synthèse peptidique, analyser les stratégies de synthèse in vitro et in vivo ;
- à partir de documents, identifier les principes, l'intérêt et les enjeux de la conception de nouveaux matériaux polymères organiques dans le cadre de la chimie verte.

Approches numériques possibles :

- utiliser l'outil numérique pour visualiser des conformations, configurations et des géométries d'approche entre molécules.
- utiliser l'outil numérique pour discuter des effets cinétiques et thermodynamiques des conditions expérimentales (contrôles cinétique ou thermodynamique).

A. Structure et réactivité des molécules organiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
Description des molécules organiques	
Représentations topologique, de Cram, de Newman, perspective. Descripteurs stéréochimiques <i>R</i> , <i>S</i> , <i>Z</i> , <i>E</i> . Chiralité. Stéréoisomérisation de configuration : énantiomérisation, diastéréoisomérisation. Activité optique, pouvoir rotatoire. Loi de Biot. Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique et cyclohexanique. Ordre de grandeur de la barrière énergétique conformationnelle.	Représenter une molécule à partir de son nom, fourni en nomenclature systématique, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques, en utilisant un type de représentation donné. Attribuer les descripteurs stéréochimiques aux centres stéréogènes. Déterminer la relation d'isomérisation entre deux structures. Relier la valeur du pouvoir rotatoire d'un mélange de stéréoisomères à sa composition. Comparer la stabilité de plusieurs conformations. Interpréter la stabilité d'un conformère donné.
Relation structure - réactivité	
Analyse de la structure électronique et géométrique. Modélisation des transferts d'électrons et écriture des mécanismes réactionnels.	Identifier et nommer les groupes caractéristiques présents dans une entité donnée. Identifier les sites électrophiles et nucléophiles des réactifs à l'aide de leurs structures de Lewis ou de leurs orbitales frontalières. Expliciter à l'aide des orbitales frontalières la géométrie d'approche entre réactifs conduisant aux produits primaires par application du principe de recouvrement maximum. Exploiter les notions de polarité et de polarisabilité pour analyser ou comparer la réactivité de différents substrats. Utiliser le formalisme des flèches courbes pour décrire un mécanisme en chimie organique.
Influence des paramètres expérimentaux	
Compétitions entre type de réaction. Contrôle cinétique, contrôle thermodynamique. Un modèle pour l'état de transition : le postulat de Hammond.	Discuter des aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations effectuées à l'aide de données tabulées et de résultats expérimentaux. Tracer, commenter et utiliser un profil énergétique à l'échelle microscopique. Reconnaître les conditions d'utilisation du postulat de Hammond et prévoir l'obtention des produits lorsque deux réactions sont en compétition.
Les grands types de mécanisme : addition, élimination, substitution, addition-élimination	
Substitution nucléophile aliphatique : mécanismes limites S_N2 et S_N1 ; propriétés cinétiques et stéréochimiques. β -élimination $E1$ et $E2$; propriétés cinétiques et stéréochimiques, régiosélectivité. Addition nucléophile. Addition-élimination.	Justifier le choix d'un mécanisme par des facteurs structuraux des substrats ou par des informations stéréochimiques sur le produit. Prévoir ou analyser la régiosélectivité, la stéréosélectivité et la stéréospécificité éventuelles d'une transformation simple en chimie organique en utilisant un vocabulaire précis.

B. Stratégie de synthèse

Notions et Contenus	Capacités exigibles
Analyse rétrosynthétique	
Approche élémentaire de la stratégie de synthèse : analyse rétrosynthétique.	Concevoir une stratégie de synthèse pour une molécule simple.
Synthèse stéréosélective	
Séparation d'énantiomères et synthèse stéréosélective.	Expliquer le rôle essentiel de la diastéréo-isomérisie lors de synthèses énantiosélectives et de séparations d'énantiomères.
Activation et protection de fonction	
Activation nucléophile des alcools	
Formation d'alcoolates par réaction acido-basique ou d'oxydo-réduction.	Comparer la nucléophilie d'alcools de différentes classes à l'aide d'arguments stériques. Comparer la nucléophilie d'un alcool et de son alcoolate. Choisir une base pour déprotoner un alcool ou un phénol à partir d'une table de pK_a .
Activation électrophile des alcools	
Activation in situ par protonation : conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène (conditions opératoires, mécanismes limites).	Comparer les réactivités des liaisons carbone-groupe caractéristique dans le cas des halogénoalcanes, des alcools, des esters sulfoniques et des ions alkyloxonium.
Formation d'esters sulfoniques :	
<ul style="list-style-type: none"> • formation d'halogénoalcane par substitution sur un tosylate ou un mésylate (conditions opératoires) ; • formation d'époxyde par substitution intramoléculaire. 	Préciser la stéréosélectivité éventuelle de la formation d'époxydes. Commenter dans une synthèse multi-étapes le choix d'une activation in situ par protonation ou par passage par un tosylate ou un mésylate.
Activation électrophile du groupe carbonyle	
Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales (APTS, appareillage de Dean-Stark), mécanisme limite de l'acétalisation en milieu acide.	Expliquer qualitativement l'augmentation de l'électrophilie du groupe carbonyle par protonation de celui-ci.
Hémiacétalisation acido-catalysée du glucose : conditions opératoires, mécanisme limite de l'hémiacétalisation en milieu acide.	Discuter la régiosélectivité de la réaction d'hémiacétalisation du glucose. Interpréter la mutarotation du glucose par le caractère renversable de l'hémiacétalisation.
Protection/Déprotection de groupe caractéristique	
Protection/déprotection du groupe carbonyle par un diol (conditions expérimentales, mécanisme de l'hydrolyse acide).	Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes.
Protection/déprotection du groupe hydroxyle par formation d'un étheroxyde benzyle.	Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe hydroxyle, d'un diol 1,2 ou 1,3 dans une synthèse multi-étapes.
Conversion de groupes caractéristiques	
Interconversion alcène-alcool	
Hydratation acide : conditions opératoires, régiosélectivité, réactivité comparée des alcènes, mécanisme limite. Transposition, mécanisme	Discuter de la régiosélectivité de la transformation à l'aide de la stabilité des ions carbénium intermédiaires. Expliquer la formation de certains produits par des

<p>schématique.</p> <p>Hydroboration d'un alcène terminal par le borane : régiosélectivité, mécanisme limite de l'addition du borane sur l'alcène ; hydrolyse oxydante.</p> <p>Déshydratation acido-catalysée d'un alcool tertiaire (conditions opératoires, régiosélectivité et stéréosélectivité éventuelles, mécanisme limite E1) ; compétition substitution-élimination dans le cas des alcools secondaires et tertiaires.</p> <p>Interconversion acide carboxylique-dérivé d'acide</p> <p>Activation du groupe carboxyle : ex situ sous forme d'un chlorure d'acyle ou d'un anhydride d'acide ; in situ par protonation, par formation d'un anhydride mixte, in vivo par formation de l'acétylCoA.</p> <p>Synthèse des esters à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>Synthèse des amides à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>Hydrolyses acide et basique des esters et des amides : conditions opératoires. Mécanisme limite de la saponification.</p> <p>Conversion par oxydoréduction Les groupes caractéristiques et leur niveau d'oxydation.</p> <p>Processus d'oxydation</p> <ul style="list-style-type: none">• Oxydation des alcools selon leur classe ; principe de l'oxydation contrôlée des alcools primaires.• Époxydation directe des alcènes par un peroxyacide ; réactivité comparée des alcènes. Ouverture des époxydes en milieu basique : mécanisme, élaboration de diols anti.• Passage de l'alcène au diol par action catalytique de OsO₄ en présence d'un co-oxydant. Coupure oxydante par action d'un mélange OsO₄/NaIO₄ (oxydation de Lemieux-Johnson) principe et conditions opératoires, intérêt en stratégie de	<p>transpositions.</p> <p>Interpréter la régiosélectivité de l'hydroboration à l'aide des effets stériques.</p> <p>Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p> <p>Comparer les réactivités électrophiles des acides carboxyliques, chlorures d'acyle, anhydrides d'acide, esters, amides, les aptitudes nucléofuges des groupes partants dans les molécules correspondantes et en déduire l'importance de l'activation du groupe carboxyle.</p> <p>Proposer et/ou analyser différents moyens d'activation d'un groupe carboxyle.</p> <p>Expliquer comment obtenir un bon rendement de synthèse d'ester à partir d'un alcool primaire ou secondaire et d'un acide carboxylique selon la méthode d'activation choisie et les conditions expérimentales.</p> <p>Justifier le choix des conditions opératoires retenues pour la synthèse des amides.</p> <p>Justifier le choix des conditions opératoires d'hydrolyse d'un dérivé d'acide.</p> <p>Utiliser la formation des esters et des amides dans le cadre d'une stratégie de synthèse nécessitant la protection d'un groupe hydroxyle ou d'un groupe amino.</p> <p>Déduire de la structure d'un polyester ou d'un polyamide la formule du ou des monomères correspondants et réciproquement.</p> <p>Identifier, le cas échéant, une interconversion entre groupes caractéristiques comme un processus d'oxydation ou de réduction du substrat ; associer les demi-équations d'oxydoréduction correspondantes.</p> <p>Déterminer le ou les produits d'oxydation d'un alcool selon sa classe. Identifier le produit d'oxydation d'un alcool primaire à l'aide de données expérimentales ou spectroscopiques. Justifier l'usage d'une base comme l'hydrogénocarbonate de sodium dans l'élaboration de l'époxyde. Discuter de la régiosélectivité de l'époxydation sur un polyène.</p> <p>Justifier la régiosélectivité et la stéréosélectivité de l'ouverture nucléophile d'un époxyde, en l'absence d'activation par un acide de Lewis ou de Bronsted.</p>
---	--

<p>synthèse.</p> <p>Processus de réduction</p> <ul style="list-style-type: none">• Réduction des composés carbonyles en alcool par action du tétrahydroborate de sodium (conditions opératoires, mécanisme réactionnel).• De l'acide ou de l'ester à l'aldéhyde ou à l'alcool primaire ; mécanisme schématique de la réduction des esters.• Hydrogénation des alcènes en catalyse hétérogène (aspects stéréochimiques, mécanisme) et en catalyse homogène.	<p>Interpréter la réduction d'un ester en alcool primaire en assimilant le réactif à un ion hydruure nucléophile.</p> <p>Identifier le produit de réduction d'un ester par un hydruure complexe, à l'aide de données fournies (chimiques et/ou spectroscopiques).</p> <p>Reconnaître ou proposer dans une stratégie de synthèse la conversion entre un ester et un aldéhyde ou un alcool primaire.</p> <p>Analyser à l'aide de données expérimentales la chimiosélectivité de réducteurs dans le cadre d'une stratégie de synthèse.</p> <p>Identifier les différents types d'interactions entre le catalyseur hétérogène et les réactifs.</p> <p>Interpréter la stéréospécificité syn de l'addition du dihydrogène à l'aide du mécanisme en catalyse hétérogène.</p> <p>Identifier les processus élémentaires intervenant lors de l'hydrogénation en catalyse homogène.</p>
Création de liaisons carbone-carbone	
<p>Création de liaisons simples C-C</p> <p>Intérêt des organométalliques dans la construction d'une chaîne carbonée ; structure et réactivité des organomagnésiens mixtes ; préparation à partir des halogénoalcanes et des alcynes terminaux.</p> <p>Synthèse magnésienne d'alcools, cétones, acides carboxyliques : conditions expérimentales, mécanismes.</p> <p>Réactivité nucléophile des énolates. Acidité d'un composé carbonyle. Tautomérie céto-énolique. Généralisation aux composés analogues (esters, α-dicétones, α-cétoesters). Ordres de grandeur des pK_a des couples correspondants.</p> <p>C-alkylation en position alpha d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite, régiosélectivité de l'alkylation des énolates.</p> <p>Aldolisation non dirigée : mécanisme en milieu basique aqueux ou alcoolique.</p> <p>Aldolisation (cétolisation) croisée dirigée avec déprotonation totale préalable : mécanisme, intérêt synthétique.</p> <p>Crotonisation : déshydratation de l'aldol (cétol) en présence d'une base, mécanisme $E1_{cb}$, régiosélectivité.</p> <p>Réaction de Michael sur une α-énone ; mécanisme.</p>	<p>Justifier l'inversion de polarité sur l'atome de carbone résultant de l'insertion de magnésium dans la liaison carbone-halogène.</p> <p>Concevoir une stratégie de synthèse par voie magnésienne.</p> <p>Représenter le(s) énol(s) isomère(s) d'un composé énolisable. Identifier un énol et représenter le composé carbonyle dont il est l'isomère.</p> <p>Écrire la formule de la base conjuguée d'un composé carbonyle énolisable et justifier sa stabilité à l'aide du formalisme de la mésomérie.</p> <p>Proposer ou justifier le choix d'une base permettant de déprotoner un composé carbonyle ou un composé analogue.</p> <p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de l'alkylation de l'énolate.</p> <p>Choisir dans le cadre d'une stratégie de synthèse les meilleures conditions de préparation d'un aldol (cétol) issu d'une aldolisation (cétolisation) croisée. Justifier par la compétition avec l'aldolisation l'impossibilité d'alkyler un aldéhyde.</p> <p>Justifier la régiosélectivité de la crotonisation en présence d'une base.</p> <p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de la réaction de Michael. Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant de réaliser une addition de Michael sur une α-énone.</p>

Réaction de Diels-Alder. Diastéréosélectivité, stéréospécificité, régiosélectivité, influence de la structure des réactifs sur la vitesse de la transformation (règle d'Alder). Réaction de rétro-Diels-Alder. Création de liaisons doubles C=C	Interpréter les résultats cinétiques, stéréochimiques et la régiosélectivité d'une réaction de Diels-Alder sous contrôle cinétique. Identifier les interactions orbitales principales et, le cas échéant, la préférence d'une approche de type endo.
Réaction de Wittig.	Identifier le dérivé carbonyle et le dérivé halogéné, précurseur de l'ylure, mis en œuvre dans la création d'une liaison C=C par une réaction de Wittig.
Métathèse des alcènes.	Identifier les précurseurs possibles pour synthétiser un alcène par métathèse. Reconnaître réactifs, produits, catalyseur et précurseur de catalyseur dans le ou les cycles catalytiques décrivant le mécanisme d'une métathèse.

PARTIE IIIbis - Parcours génie des procédés : synthèse organique

Médicaments, produits phytosanitaires, matériaux polymères de synthèse aussi différents que les latex de peinture ou les boucliers thermiques des véhicules spatiaux... Synthèses en chimie fine ou productions de fort tonnage découlent d'une démarche d'ingénierie moléculaire s'appuyant entre autres sur les apports de la chimie organique.

L'élaboration, l'identification des structures et la prévision de la réactivité des molécules obéissent à des règles fondamentales, partiellement abordées dans cette partie, dont l'objectif est à la fois de faire comprendre les enjeux et la logique de la synthèse organique et de décrire, d'analyser et de modéliser quelques transformations organiques simples à l'échelle microscopique, de manière à apporter des éléments de culture dans ce domaine à des étudiants qui le découvrent.

Cela nécessite l'acquisition de compétences liées à la description géométrique des structures, à l'analyse de la réactivité des espèces et à la description des grands types de réactions. Ces notions sont présentées sur des exemples donnés, mais dans le but d'une maîtrise permettant un réinvestissement sur des situations analogues.

Ainsi, une présentation par mécanismes ou de type fonctionnelle peut être envisagée, au libre choix de l'enseignant. Néanmoins, il s'agit de privilégier une approche mécanistique pour faire comprendre et maîtriser les raisonnements plutôt que pour empiler les connaissances.

L'enseignement de la chimie organique s'appuie sur les connaissances et capacités acquises en thermodynamique et cinétique chimiques et exploite les modèles de description des structures et de la réactivité, introduits dans la partie « Architecture de la matière ».

Le cours et les activités s'appuient sur des exemples issus aussi bien des domaines de la chimie fine, de la chimie du vivant et de la chimie industrielle et permettent une sensibilisation aux principes de la chimie verte.

À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques ;
- maîtriser et utiliser différentes représentations schématiques d'un objet ;
- relier les grandeurs spectroscopiques à la structure de l'espèce chimique étudiée.
- choisir le ou les modèle(s) pertinent(s) de description géométrique, électronique ou orbitale d'une espèce chimique pour rendre compte de sa réactivité ;
- identifier dans une entité complexe la partie utile au raisonnement ;
- utiliser des modèles de prédiction de l'évolution du système dans le cadre des transformations proposées ;
- pratiquer un raisonnement par analogie (analyse de réactivités et écriture de mécanismes) ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer un schéma de synthèse ;
- proposer une stratégie de synthèse dans le cadre d'un problème ouvert.

Approches numériques possibles :

- utiliser l'outil numérique pour visualiser des conformations, configurations et des géométries d'approche entre molécules.
- utiliser l'outil numérique pour discuter des effets cinétiques et thermodynamiques des conditions expérimentales (contrôles cinétique ou thermodynamique).

A. Structure et réactivité des molécules organiques

Notions et contenus

Capacités exigibles

Description des molécules organiques	
Représentations topologique, de Cram, de Newman, perspective. Descripteurs stéréochimiques <i>R</i> , <i>S</i> , <i>Z</i> , <i>E</i> . Chiralité Stéréoisomérisation de configuration : énantiomérisation, diastéréoisomérisation. Activité optique, pouvoir rotatoire. Loi de Biot. Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique et cyclohexanique. Ordre de grandeur de la barrière énergétique conformationnelle.	Représenter une molécule à partir de son nom, fourni en nomenclature systématique, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques, en utilisant un type de représentation donné. Attribuer les descripteurs stéréochimiques aux centres stéréogènes. Déterminer la relation d'isomérisation entre deux structures. Relier la valeur du pouvoir rotatoire d'un mélange de stéréoisomères à sa composition. Comparer la stabilité de plusieurs conformations. Interpréter la stabilité d'un conformère donné.
Relation structure - réactivité	
Analyse de la structure électronique et géométrique. Modélisation des transferts d'électrons et écriture des mécanismes réactionnels	Identifier et nommer les groupes caractéristiques présents dans une entité donnée. Identifier les sites électrophiles et nucléophiles des réactifs à l'aide de leurs structures de Lewis. Exploiter les notions de polarité et de polarisabilité pour analyser ou comparer la réactivité de différents substrats. Utiliser le formalisme des flèches courbes pour décrire un mécanisme en chimie organique.
Influence des paramètres expérimentaux	
Compétitions entre type de réaction. Contrôle cinétique, contrôle thermodynamique. Un modèle pour l'état de transition : le postulat de Hammond	Discuter des aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations effectuées à l'aide de données tabulées et de résultats expérimentaux. Tracer, commenter et utiliser un profil énergétique à l'échelle microscopique. Reconnaître les conditions d'utilisation du postulat de Hammond et prévoir l'obtention des produits lorsque deux réactions sont en compétition.
Les grands types de mécanisme : addition, élimination, substitution, addition-élimination	
Substitution nucléophile aliphatique : mécanismes limites S_N2 et S_N1 ; propriétés cinétiques et stéréochimiques. β -élimination $E1$ et $E2$; propriétés cinétiques et stéréochimiques, régiosélectivité. Addition nucléophile. Addition-élimination.	Justifier le choix d'un mécanisme par des facteurs structuraux des substrats ou par des informations stéréochimiques sur le produit. Prévoir ou analyser la régiosélectivité, et la stéréosélectivité éventuelles d'une transformation simple en chimie organique en utilisant un vocabulaire précis.

B. Stratégie de synthèse

Notions et Contenus	Capacités exigibles
Analyse rétrosynthétique Approche élémentaire de la stratégie de synthèse : analyse rétrosynthétique.	Concevoir une stratégie de synthèse pour une molécule simple.
Activation et protection de fonction Activation nucléophile des alcools	

<p>Formation d'alcoolates par réaction acido-basique ou d'oxydo-réduction.</p> <p>Activation électrophile des alcools Activation in situ par protonation : Conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène (conditions opératoires, mécanismes limites).</p> <p>Activation électrophile du groupe carbonyle Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales (APTS, appareillage de Dean-Stark).</p> <p>Protection/Déprotection de groupe caractéristique Protection/déprotection du groupe carbonyle par un diol (conditions expérimentales). Protection/déprotection du groupe hydroxyle par formation d'un étheroxyde benzylique.</p>	<p>Comparer la nucléophilie d'alcools de différentes classes à l'aide d'arguments stériques.</p> <p>Comparer la nucléophilie d'un alcool et de son alcoolate.</p> <p>Choisir une base pour déprotomer un alcool ou un phénol à partir d'une table de pK_a.</p> <p>Comparer les réactivités des liaisons carbone-groupe caractéristique dans le cas des halogénoalcanes, des alcools, et des ions alkyloxonium.</p> <p>Expliquer qualitativement l'augmentation de l'électrophilie du groupe carbonyle par protonation de celui-ci.</p> <p>Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse.</p> <p>Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe hydroxyle, d'un diol 1,2 ou 1,3 dans une synthèse multi-étapes.</p>
<p>Conversion de groupes caractéristiques</p>	
<p>Interconversion alcène-alcool Hydratation acide : conditions opératoires, régiosélectivité, réactivité comparée des alcènes, mécanisme limite.</p> <p>Déshydratation acido-catalysée d'un alcool tertiaire (conditions opératoires, régiosélectivité et stéréosélectivité éventuelles, mécanisme limite E1) ; compétition substitution-élimination dans le cas des alcools secondaires et tertiaires.</p> <p>Interconversion acide carboxylique-dérivé d'acide Activation du groupe carboxyle : ex situ sous forme d'un chlorure d'acyle ou d'un anhydride d'acide ; in situ par protonation.</p> <p>Synthèse des esters à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>Hydrolyses acide et basique des esters : conditions opératoires. Mécanisme limite de la saponification.</p>	<p>Discuter de la régiosélectivité de la transformation à l'aide de la stabilité des ions carbénium intermédiaires.</p> <p>Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p> <p>Comparer les réactivités électrophiles des acides carboxyliques, chlorures d'acyle, anhydrides d'acide, esters, les aptitudes nucléofuges des groupes partants dans les molécules correspondantes et en déduire l'importance de l'activation du groupe carboxyle.</p> <p>Proposer et/ou analyser différents moyens d'activation d'un groupe carboxyle.</p> <p>Expliquer comment obtenir un bon rendement de synthèse d'ester à partir d'un alcool primaire ou secondaire et d'un acide carboxylique selon la méthode d'activation choisie et les conditions expérimentales.</p> <p>Utiliser la formation des esters dans le cadre d'une stratégie de synthèse nécessitant la protection d'un groupe hydroxyle.</p> <p>Justifier le choix des conditions opératoires d'hydrolyse d'un dérivé d'acide.</p>

<p>Conversion par oxydoréduction Les groupes caractéristiques et leur niveau d'oxydation.</p> <p>Processus d'oxydation</p> <ul style="list-style-type: none">• Oxydation des alcools selon leur classe ; principe de l'oxydation contrôlée des alcools primaires.• Passage de l'alcène au diol par action catalytique de OsO₄ en présence d'un co-oxydant. Coupure oxydante par action d'un mélange OsO₄/NaIO₄ (oxydation de Lemieux-Johnson) principe et conditions opératoires, intérêt en stratégie de synthèse. <p>Processus de réduction</p> <ul style="list-style-type: none">• Réduction des composés carbonyles en alcool par action du tétrahydroborate de sodium (conditions opératoires, mécanisme réactionnel).• Hydrogénation des alcènes en catalyse hétérogène (aspects stéréochimiques, mécanisme) et en catalyse homogène.	<p>Identifier, le cas échéant, une interconversion entre groupes caractéristiques comme un processus d'oxydation ou de réduction du substrat ; associer les demi-équations d'oxydoréduction correspondantes.</p> <p>Déterminer le ou les produits d'oxydation d'un alcool selon sa classe.</p> <p>Identifier les différents types d'interactions entre le catalyseur hétérogène et les réactifs. Interpréter la stéréospécificité syn de l'addition du dihydrogène à l'aide du mécanisme en catalyse hétérogène.</p>
<p>Création de liaisons carbone-carbone</p> <p>Création de liaisons simples C-C Intérêt des organométalliques dans la construction d'une chaîne carbonée ; structure et réactivité des organomagnésiens mixtes ; préparation à partir des halogénoalcanes et des alcynes terminaux.</p> <p>Synthèse magnésienne d'alcools et acides carboxyliques : conditions expérimentales, mécanismes.</p> <p>Création de liaisons doubles C=C Réaction de Wittig.</p>	<p>Justifier l'inversion de polarité sur l'atome de carbone résultant de l'insertion de magnésium dans la liaison carbone-halogène.</p> <p>Concevoir une stratégie de synthèse par voie magnésienne.</p> <p>Identifier le dérivé carbonyle et le dérivé halogéné, précurseur de l'ylure, mis en œuvre dans la création d'une liaison C=C par une réaction de Wittig.</p>